

Desenvolvimento de uma célula aplicada à geração de descargas parciais a partir de uma fonte de baixa tensão

Filipe Bulhões Froes* Helon David de Macedo**
Euler Cássio Tavares de Macedo**
José Mauricio Ramos de Souza Neto**

* Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail: filipe.froes@cear.ufpb.br).

** Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, PB, (e-mail: {helon, euler, mauricio}@cear.ufpb.br).

Abstract: The occurrence of partial discharges at High Voltage (HV) equipment may indicate its insulation integrity. Understanding this phenomenon is crucial for providing the correct monitoring and diagnosis for any possible damage related to it. To allow a low cost study of this discharges, control the conditions of their occurrence and minimize the dangers and costs of research, in this paper; it was developed a low cost partial discharge (PD) generator model capable to simulate different kinds of insulation defects. With this generator, it is possible to emulate several PD pulses patterns quite similar of those generated by real on-site equipment. In this article, there are described the project and construction of a model of a low voltage ($\approx 3kV$) PD generator, when compared with the transmission voltage levels, made with fast prototyping technology by deposition of molten material and 3D printing.

Resumo: A ocorrência de descargas parciais em um equipamento pode indicar o estado de integridade do mesmo, sendo crucial a compreensão desse fenômeno para que seja feito o monitoramento e o correto diagnóstico de possíveis avarias relacionadas ao fenômeno. Nesse sentido, o entendimento do mecanismo gerador das descargas parciais é crucial. Para facilitar esse estudo, controlar as condições em que ocorrem as descargas e minimizar os riscos e os custos de pesquisa, foi desenvolvido um modelo de célula geradora de descargas parciais com diferentes configurações de defeitos. Com essa célula pode-se gerar diversos tipos de descargas com padrões semelhantes aos de descargas que ocorrem em equipamentos defeituosos ou desgastados. Nesse artigo, são descritos o projeto e implementação de uma célula para geração de descargas parciais em baixa tensão ($\approx 3kV$), comparada aos níveis de transmissão, confeccionada com tecnologia de prototipação rápida por deposição de material fundido e impressão 3D.

Keywords: Partial discharges - generator - low voltage - model

Palavras-chaves: Descargas parciais - célula - baixa tensão - modelo

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de descargas parciais (DP) em equipamentos pode indicar o estado de integridade do isolamento do mesmo. Ao longo de sua vida útil, com a degradação do isolamento ou o desgaste de peças, é natural que ocorra o aumento tanto da frequência de ocorrência quanto da intensidade das descargas parciais geradas nesses equipamentos. Assim, o monitoramento dos níveis de DP é parte crucial da manutenção preventiva, principalmente de equipamentos de alta tensão. Por esse motivo, o entendimento do mecanismo gerador desse fenômeno é amplamente estudado. As células geradoras de DP têm um papel muito importante nesse sentido, sendo uma alternativa segura e confiável para a geração dessas descargas de maneira controlada em laboratório.

Existem diversos tipos de descargas, contudo, elas podem ser classificadas em três classes: descargas do tipo interna, descargas de superfície e descargas do tipo corona. A grande maioria dessas estruturas de geração de DP utiliza fontes de alimentação de níveis comparáveis às tensões de distribuição (13,8kV; 69kV), subtransmissão (138kV) ou até às tensões de transmissão (230kV; 600kV; 765kV), necessitando, muitas vezes de um laboratório de alta tensão para que ensaios possam ser feitos com tais estruturas. O presente estudo tem o intuito de desenvolver um modelo de célula geradora de descargas parciais de fácil confecção que utilize uma fonte de alimentação de baixa tensão ($\approx 3kV$), quando comparada aos níveis de distribuição e transmissão, de forma que seja possível realizar ensaios sem a necessidade de um laboratório de alta tensão.

O modelo foi simulado no software de análise de elementos finitos Comsol Multiphysics® e impresso em 3D no Labo-

ratório de Fabricação Digital (FABLAB) da Universidade Federal da Paraíba. Com essa célula, pode-se gerar diversos tipos de descargas. Para esse estudo, foram simulados e testados dois tipos de defeitos para a geração de descargas parciais com padrão similar às decargas dos tipos interna e corona, que são, respectivamente, os defeitos do tipo ponta-ponta flutuante (P-PF) e do tipo ponta-plano (P-P).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Kreuger (1989), a descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre em uma região do espaço sujeita a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa. O aumento da intensidade e recorrência de descargas parciais em equipamentos geralmente ocorre em equipamentos cujo sistema de isolamento é defeituoso ou está degradado. Assim, afim de facilitar a manutenção desses equipamentos e evitar falhas catastróficas nos mesmos, como por exemplo curto-circuitos em transformadores, a detecção e monitoramento de descargas parciais nos mais diversos tipos de equipamentos como transformadores, buchas e isoladores, bem como a classificação dessas descargas de acordo com o defeito são de suma importância e têm sido amplamente pesquisados.

Segundo Forssén et al. (2005), as duas condições necessárias para que ocorra uma descarga em um dielétrico são: valor de campo elétrico alto o suficiente para romper a rigidez dielétrica do material isolante e uma quantidade suficiente de elétrons livres para iniciar uma avalanche. A tensão em que o campo elétrico ultrapassa o valor da rigidez dielétrica é chamada de tensão de injeção. Além disso, a quantidade de elétrons livres disponíveis para a avalanche de elétrons afeta o tempo, com relação ao sinal de tensão, em que elas ocorrem. Após uma quantidade grande o suficiente de descargas, esse número de elétrons disponíveis cai, fazendo com que ocorra um atraso, ou seja, um defasamento das descargas com relação ao ângulo no qual as descargas ocorriam anteriormente. Além disso, as descargas passam a ocorrer em tensões mais elevadas que a tensão de injeção.

Nesse sentido, segundo Carminati et al. (1997), a carga aparente deslocada durante um pulso de descarga parcial é uma medida muito importante para o estudo desse fenômeno. Ela se relaciona diretamente com a falha do isolamento na qual ocorre tal evento, estando diretamente ligada às características físicas da mesma, como tamanho da cavidade, material do isolamento onde a cavidade foi formada e estado de degradação.

Em Macedo (2014), diz que as descargas parciais podem ser classificadas em três classes dependendo da sua localização: descargas internas, corona e de superfície.

Para facilitar o estudo das descargas parciais, pesquisadores desenvolveram formas de gerar descargas parciais de maneira segura e controlada, no intuito de compreender melhor esse fenômeno e suas causas em um equipamento defeituoso. Os defeitos dos isolamentos são elaborados de forma a reproduzir os padrões de descarga gerados a partir de defeitos com isolamento problemático, os quais se enquadram nas três referidas classes.

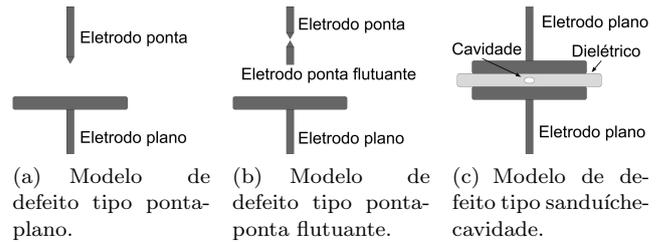


Figura 1. Modelos tradicionais de defeitos para geração de descargas parciais.

Dessa forma, pode-se reproduzir os três tipos de descargas com configurações do tipo ponta-plano (Figura 1(a)), para geração de corona, ponta-ponta flutuante (Figura 1(b)) e sanduíche-cavidade (Figura 1(c)), para descarga do tipo interna e esfera-dielétrico-plano para descargas de superfície.

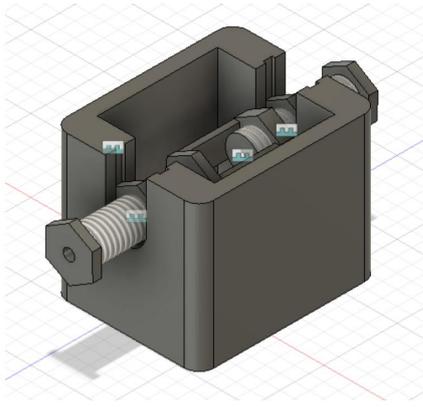
3. METODOLOGIA

3.1 Modelo

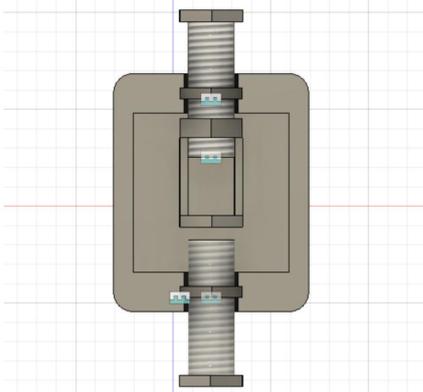
Foi desenvolvida uma estrutura que consiste em um bloco vazado, sem uma das paredes laterais para que se possa ver seu interior, com dois encaixes para porcas sextavadas, para a fixação de parafusos feitos de material isolante que possuem um furo no centro, no sentido longitudinal para a fixação dos eletrodos. Dessa forma a parte das estruturas dos defeitos a serem testados onde ocorrem as descargas estará distante das paredes da célula, suspensas no ar, isoladas pelos parafusos e permitindo o alinhamento dos eletrodos. O corpo da célula possui $61,5mm$ de comprimento, $50mm$ de largura e $50mm$ de altura, com arestas externas arredondadas. As duas laterais com o encaixe para as porcas sextavadas têm $10,25mm$ de espessura, as demais laterais do corpo da célula têm $5mm$ de espessura. O parafuso que sustenta o eletrodo tipo ponta tem $38mm$ de comprimento, já o que sustenta o eletrodo plano tem $31,25mm$ de comprimento, ambos possuem $11,7mm$ de diâmetro. O modelo desenvolvido está representado na Figura 2.

Para a descarga do tipo interna, o modelo escolhido foi o tipo ponta-ponta flutuante. Nesse modelo, há duas agulhas com as pontas voltadas uma para a outra, sendo uma delas a ponta fixa e a outra a ponta flutuante, e um eletrodo plano do lado oposto. A ponta fixa está embutida em um parafuso de plástico (PLA), de forma que apenas a ponta da agulha fique para fora e o outro lado possa ser ligado a um dos terminais da fonte de alta tensão. A ponta flutuante está isolada eletricamente da ponta fixa e do eletrodo plano, fixada em uma estrutura do mesmo material do parafuso citado, feita para ser acoplada na ponta do referido parafuso, onde a ponta fixa está embutida, de forma que seja possível regular a distância entre as pontas. O eletrodo plano é acoplado ao outro parafuso de plástico (ABS), sendo ligado ao outro terminal da fonte de alimentação. A distância entre as pontas é chamada de d e a distância entre a base do eletrodo ponta flutuante e o plano é chamada de D , como é ilustrado na Figura 3(a).

Para a descarga do tipo Corona, o modelo escolhido foi o ponta-plano. Nesse modelo, representado na Figura 3(b), há apenas a ponta fixa, ligada a um dos terminais da fonte

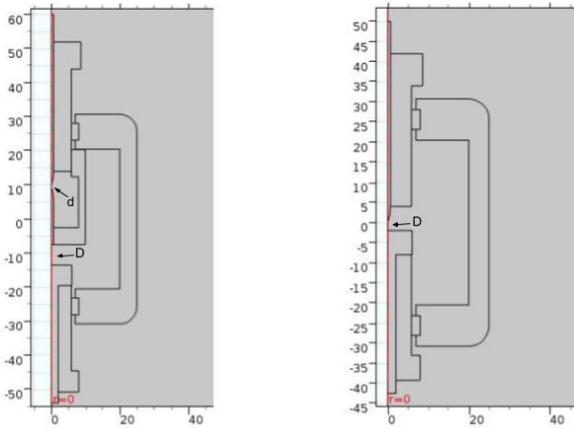


(a) Vista em perspectiva da estrutura desenvolvida.



(b) Vista superior do modelo 3D da estrutura.

Figura 2. Modelo 3D da estrutura proposta.



(a) Modelo da célula para geração de descargas do tipo interna.

(b) Modelo da célula para geração de descargas do tipo corona.

Figura 3. Modelos das configurações desenvolvidas.

de alimentação e o eletrodo plano ligado ao outro terminal, separados por uma distância D .

3.2 Simulação

Foi feito o modelo em 2D eixo-simétrico da seção transversal no sentido longitudinal da célula proposta no software utilizado para simulação. Na simulação, o objetivo era encontrar uma combinação de distâncias entre os eletrodos

que resultasse em valores de campo elétrico superiores à rigidez dielétrica do ar apenas na região entre os eletrodos tipo ponta no caso do defeito tipo P-PF e na região ao redor da ponta, no caso do defeito tipo P-P. Dessa forma, pode-se garantir uma das duas condições mínimas necessárias para a ocorrência das descargas parciais, nesse caso, valores de campo elétrico superiores à rigidez dielétrica do ar, $33kV/cm$, na região de interesse para cada defeito. Sendo assim, foram simuladas as configurações de defeito para geração de descargas do tipo interna e do tipo corona.

Foram feitas simulações estáticas 2D eixo-simétricas, devido à simetria do modelo, cujo plano de corte fica sobre eixo de simetria dos eletrodos, no sentido longitudinal da célula. As simulações foram feitas com uma tensão $V_0 = 2250V$, que é a tensão máxima da fonte utilizada no experimento. Vale ressaltar que esse valor de tensão foi escolhido tendo em vista a fonte de alimentação disponível no laboratório onde o modelo foi desenvolvido, um transformador com relação de espiras de 1 : 10, comumente encontrado em aparelhos microondas, com tensão máxima no secundário de 2250V. Assim, mantendo-se a tensão máxima fixa, a simulação foi feita variando as distâncias entre as pontas e entre a base do eletrodo ponta flutuante e o plano, d e D , para o defeito do tipo ponta-ponta flutuante, e a distância entre o eletrodo tipo ponta e o eletrodo plano, D , para o defeito tipo ponta-plano.

Dessa forma, foram testadas algumas configurações para cada defeito, no intuito de encontrar a configuração com maior probabilidade de geração de descargas parciais e menor probabilidade de ocorrência de uma descarga completa.

Para tanto, foi feita a representação do plano de corte de interesse no Comsol. Os domínios delimitados pelas formas dos elementos da estrutura tiveram os respectivos materiais associados: O material ABS foi atribuído à base da célula, bem como as porcas sextavadas e o parafuso de sustentação do eletrodo plano. O material PLA foi atribuído ao parafuso de sustentação do eletrodo tipo ponta e ao suporte da ponta flutuante. As pontas foram simuladas como o material *built in* do Comsol, *softened iron* e o eletrodo plano foi simulado como alumínio.

Para os materiais de impressão 3D, ABS e PLA, simulados, foram utilizados os valores de permissividade elétrica disponíveis em Veselý et al. (2018), onde foi verificada a viabilidade da utilização desses materiais na confecção do protótipo, devido aos valores de rigidez dielétrica apresentados no referido artigo.

Foi utilizado o recurso *parametric sweep* para gerar um conjunto com dez simulações para o defeito tipo ponta-ponta flutuante e vinte e uma simulações para o defeito tipo ponta-plano. Com os resultados, foram gerados mapas de intensidade do campo elétrico no plano de corte e gráficos de intensidade de campo elétrico sobre o eixo de simetria em função do comprimento do arco. Além disso, foram gerados gráficos de valor máximo de campo elétrico em função das distâncias entre os eletrodos. Dessa forma, foi possível verificar em quais configurações era esperado que ocorressem descargas. Todas as simulações foram feitas utilizando uma malha controlada pela física do problema com a maior resolução disponível pelo simulador, para um

maior detalhamento nas regiões propícias a acúmulo de carga elétrica.

Descarga interna: Na simulação, a distância entre o eletrodo plano e a base do eletrodo ponta flutuante foi mantida constante, com 9mm , enquanto a distância entre as pontas foi variada entre 1mm e $0,1\text{mm}$, com passo de $0,1\text{mm}$. O eletrodo tipo ponta fixa foi configurado com a tensão $V_0 = 2250\text{V}$, o eletrodo plano e as bordas do domínio infinito foram configurados como o terra e a ponta flutuante foi configurada como potencial flutuante. Nota-se no gráfico, ilustrado na Figura 4, que a partir da configuração com $d = 0,5\text{mm}$ até a configuração com $d = 0,1\text{mm}$, o valor de campo elétrico já supera o valor referente à rigidez dielétrica do ar. Apesar disso, para o defeito do tipo ponta-ponta flutuante, a configuração com maior probabilidade de ocorrência de descargas parciais foi a configuração com $d = 0,1\text{mm}$, para $D = 9\text{mm}$, dado que foi a configuração que apresentou maior valor de campo elétrico na região de interesse. Tal configuração apresentou nível máximo de campo elétrico sobre o eixo de simetria superior a 140kV/cm , atendendo à condição mínima, mas não suficiente, de valor de campo elétrico superior a 33kV/cm . Podem ser verificados os gráficos contendo os valores máximos de campo elétrico entre os eletrodos tipo ponta em função da variável d , representado na Figura 4, os valores de campo elétrico ao longo do eixo de simetria da configuração escolhida ($d = 0,1\text{mm}$), representado na Figura 5 e o mapa de intensidade de campo elétrico na célula para a configuração escolhida nas Figuras 6(a) e 6(b).

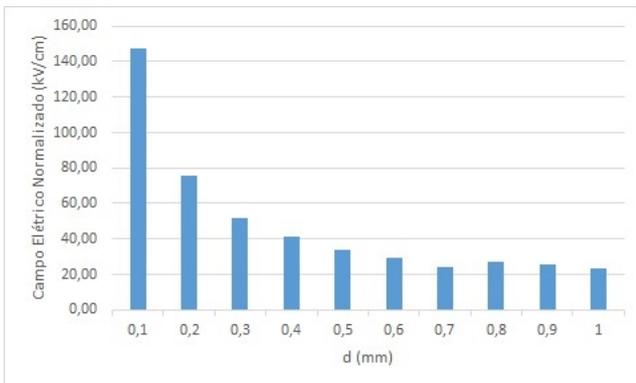


Figura 4. Gráfico do campo elétrico máximo sobre o eixo de simetria em função do parâmetro "Distância entre os eletrodos tipo ponta (d)" para o defeito tipo ponta-ponta flutuante.

Descarga do tipo Corona: Na simulação do defeito tipo ponta-plano, a distância entre os eletrodos foi variada de 2mm a 4mm , com passo de $0,1\text{mm}$. Semelhante à simulação do defeito tipo ponta-ponta flutuante, o eletrodo tipo ponta fixa foi configurado com a tensão $V_0 = 2250\text{V}$ e o eletrodo plano e as bordas do domínio infinito foram configurados como o terra. Semelhante ao defeito tipo ponta-ponta flutuante, para o defeito do tipo ponta-plano foram analisados os gráficos de intensidade de campo elétrico sobre o eixo de simetria e os mapas de intensidade de campo elétrico em toda a estrutura. Como pode ser verificado na Figura 9, o maior valor de campo elétrico para esse tipo de defeito não ocorre sobre o eixo de simetria

e sim na região lateral, próxima à ponta. Notou-se que nenhuma das configurações apresentou valor de campo elétrico superior a 33kV/cm sobre eixo de simetria, sendo o melhor resultado a configuração com $D = 2,2\text{mm}$, alcançando valor máximo igual a $32,8\text{kV/cm}$. Contudo, a configuração que apresentou maior valor global de campo elétrico foi a configuração com $D = 2\text{mm}$. Apesar de, sobre o eixo de simetria, essa configuração não ter apresentado o maior valor de campo elétrico entre as configurações analisadas, ela foi a configuração que apresentou a maior área ao redor da ponta com valor de campo elétrico superior à rigidez dielétrica do ar e maior valor global de campo elétrico, aproximando-se de 35kV/cm , dessa forma sendo a configuração escolhida para o teste em laboratório. Podem ser verificados os gráficos referentes ao valor máximo de campo elétrico em função da distância entre os eletrodos, valores de campo elétrico sobre o eixo de simetria e mapas de campo elétrico sobre o plano de corte estudado da configuração escolhida nas Figuras 7, 8 e 9.

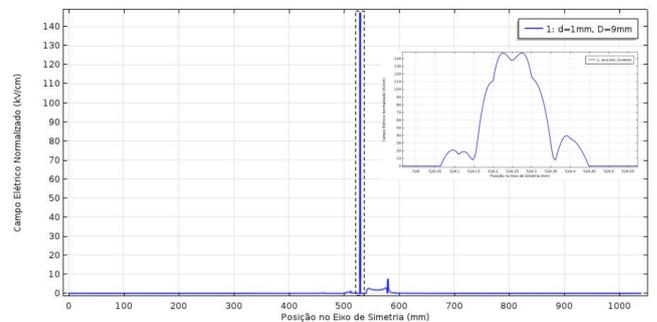
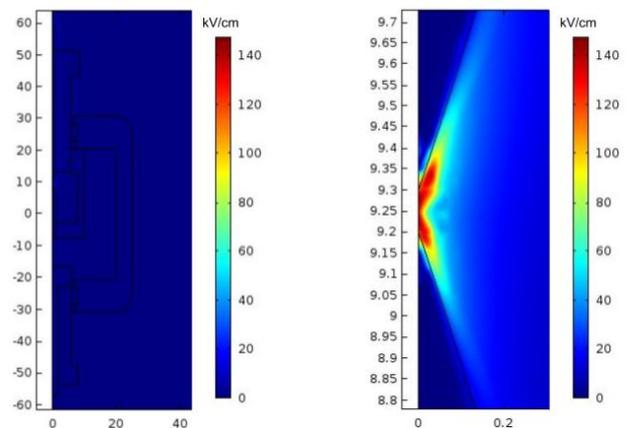


Figura 5. Gráfico da representação do campo elétrico em função da posição sobre o eixo de simetria para o defeito tipo ponta-ponta flutuante. Em destaque, imagem ampliada da região indicada no gráfico.



(a) Mapa de intensidade de campo elétrico para o defeito tipo ponta-ponta flutuante com $d = 0,1\text{mm}$.

(b) Vista aproximada das pontas na simulação do defeito tipo ponta-ponta flutuante.

Figura 6. Mapas de intensidade de campo elétrico para o defeito tipo ponta-ponta flutuante.

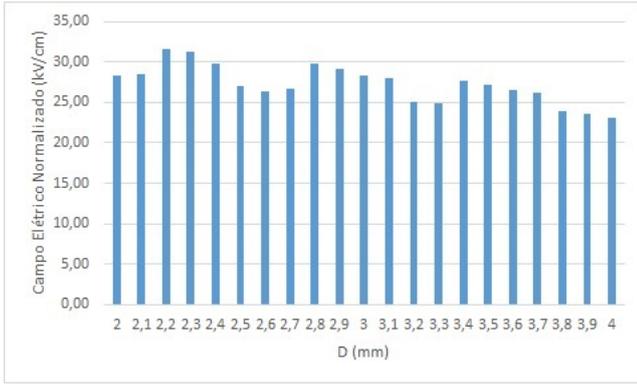


Figura 7. Gráfico do campo elétrico máximo sobre o eixo de simetria em função do parâmetro D para o defeito tipo ponta-plano.

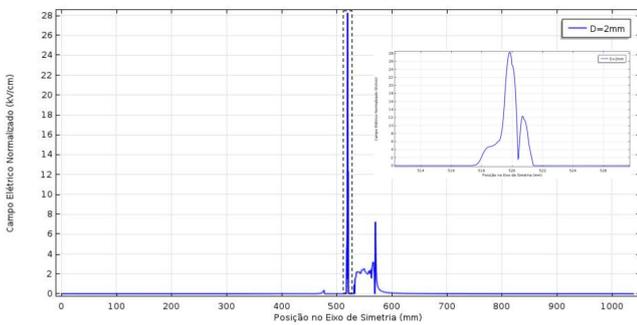
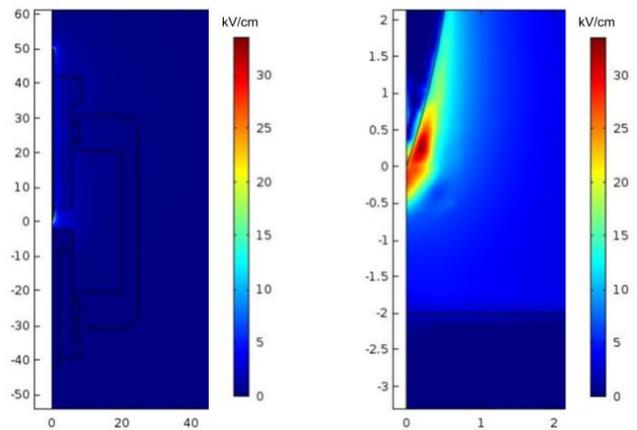


Figura 8. Gráfico do campo elétrico em função da posição sobre o eixo de simetria para o defeito tipo ponta-plano. Em destaque, imagem ampliada da região indicada no gráfico.



(a) Mapa de intensidade de campo elétrico para o defeito tipo ponta-plano com $D = 2mm$. (b) Vista aproximada da região próxima aos eletrodos para o defeito tipo corona.

Figura 9. Mapas de intensidade de campo elétrico para o defeito tipo ponta-plano.

Vale ressaltar que em nenhuma das simulações de ambos os defeitos o valor de campo elétrico superou o valor da rigidez dielétrica do ar ou dos materiais dielétricos

utilizados na simulação em outra região que não a região onde era esperado que houvessem as descargas.

3.3 Protótipo

Uma vez que foram atingidos os objetivos da simulação, foram utilizadas as medidas da estrutura para projetar o protótipo. Assim, foi feito o modelo 3D de acordo com as medidas e materiais utilizados na simulação e em seguida confeccionado no FABLAB da UFPB. Em seguida os eletrodos foram fixados e ajustados nos parafusos, a célula foi devidamente montada e, posteriormente, acoplada ao módulo de geração de descargas parciais.

3.4 Módulo de geração de descargas parciais e estrutura de medição

A estrutura de geração de DP, consiste em um transformador, como fonte de tensão, um divisor de tensão com relação $V_{out}/V_{in} = 1/1000$, para aquisição da tensão da fonte, um capacitor de $800nF$, com tensão máxima de $3kV$ e a célula, todos conectados em paralelo com a fonte de tensão. Foi colocado também um fusível de $250mA$ em série com a célula e o capacitor para proteção da estrutura. Tal estrutura de medição está de acordo com um dos modelos de medições de descargas parciais apresentado na norma IEC 60270 (2000) e está exemplificado na Figura 10.

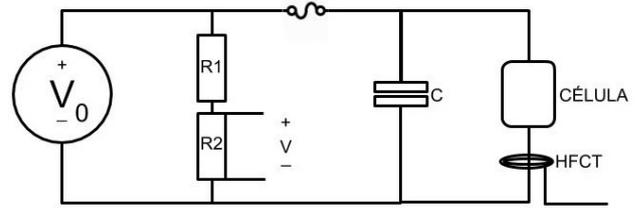


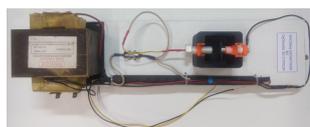
Figura 10. Modelo da estrutura de medição.

Para medir os pulsos gerados pelas descargas, foi necessário o uso de um osciloscópio de $200MHz$ com $4GSa/s$ e um transformador de corrente de alta frequência (*HFCT-High Frequency Current Transformer*), visto que é um método não invasivo e de boa sensibilidade. Tal dispositivo foi posicionado de forma a enlaçar o cabo de alimentação do eletrodo plano e conectado a um dos canais do osciloscópio. O outro canal do osciloscópio foi conectado à saída do divisor de tensão, de modo que se possa verificar o sincronismo do sinal de tensão senoidal da fonte de alimentação com os pulsos adquiridos. As fotos da célula e do módulo estão ilustradas na Figura 11.

4. RESULTADOS E MEDIÇÕES

Nos ensaios experimentais realizados, foi utilizado um regulador de tensão monofásico, variavolt, para alimentar o transformador. Um multímetro digital foi utilizado para checar a tensão no primário durante os ensaios. A tensão de alimentação da célula, utilizada durante os ensaios, foi de aproximadamente $V_0 = 1600V_{RMS}$.

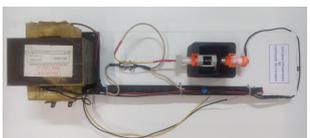
Foi verificada a ocorrência de descargas parciais, como esperado, para as configurações escolhidas de ambos os



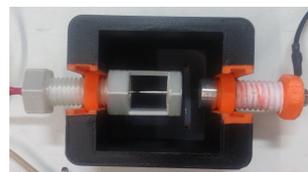
(a) Foto do módulo para geração de descargas parciais com a configuração ponta-plano.



(b) Foto da célula com a configuração ponta-plano.



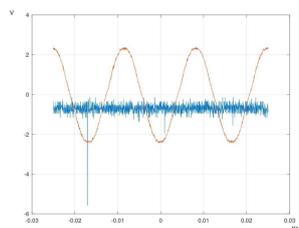
(c) Foto do módulo para geração de descargas parciais com a configuração ponta-ponta flutuante.



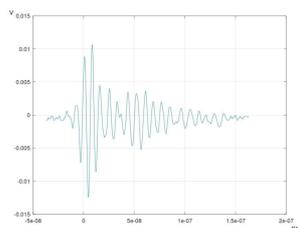
(d) Foto da célula com a configuração ponta-ponta flutuante.

Figura 11. Fotos do módulo para geração de descargas parciais.

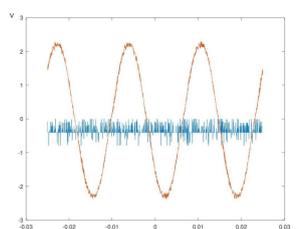
defeitos. As formas de onda dos sinais obtidos durante os ensaios estão disponíveis na Figura 12. Para a Figura 12(a), o sinal representado em laranja está em uma escala 1000 : 1 e para a Figura 12(c) o sinal está representado em uma escala de 100 : 1.



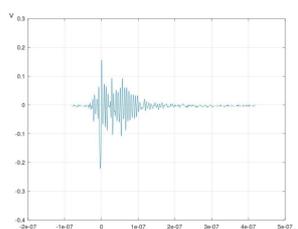
(a) Sinal da fonte de tensão em laranja e sinal adquirido pelo HFCT em azul para defeito do tipo ponta-plano com $D = 2mm$.



(b) Pulso gerado em laboratório com defeito tipo ponta-plano captado pelo HFCT.



(c) Sinal da fonte de tensão em laranja e sinal adquirido pelo HFCT em azul para defeito tipo ponta-ponta flutuante com $d = 0,1mm$.



(d) Pulso gerado em laboratório com defeito tipo ponta-ponta flutuante captado pelo HFCT.

Figura 12. Gráficos gerados a partir dos dados das medições feitas em laboratório com a estrutura proposta.

Para o defeito do tipo ponta-ponta flutuante, foram geradas descargas de amplitude máxima de aproximadamente $150mV$ e com duração de $300ns$. As descargas ocorreram, em grande maioria, no mesmo ponto com relação ao sinal de tensão, no primeiro quadrante. Notou-se que a tensão

na qual as descargas ocorreram foi a mesma na grande maioria das vezes.

Equitativamente, para o defeito tipo ponta-plano, foram geradas descargas de amplitude máxima $10mV$ e com duração $250ns$. As descargas ocorreram, majoritariamente, nos picos de tensão da fonte de alimentação, entre os quadrantes 2 e 3.

As características dos pulsos verificadas a partir dos dados coletados em laboratório dos sinais gerados pelos dois tipos de defeitos estão de acordo com as características de descargas parciais do tipo descarga interna, e corona de acordo com Neto (2014).

5. CONCLUSÕES

Verificou-se a partir de simulações e experimentos que a geração de descargas parciais utilizando fontes de alimentação de baixa tensão, em comparação à tensão de distribuição, é possível a partir de uma célula geradora de descargas parciais, sem a necessidade de um laboratório de alta tensão, utilizando materiais de baixo custo de aquisição. O modelo desenvolvido mostrou-se muito promissor dada à consistência dos pulsos adquiridos em comparação com as formas de onda típicas das descargas emuladas e dada à versatilidade do conceito proposto, uma vez que o mesmo pode ser facilmente modificado para receber outros tipos de defeito, além de ser de fácil transporte, operação e não requer instalação, sendo uma alternativa, inclusive, para testes ao ar livre. Além disso, foi constatada a potencialidade da utilização dos materiais convencionais de impressão 3D como alternativas viáveis de materiais de confecção desse tipo de estrutura. Com isso, o campo de estudo a respeito desse fenômeno torna-se ainda mais amplo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao PIBIC da Universidade Federal da Paraíba por fomentar a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- E. Carminati and M Lazzaroni. A Contribution in Partial Discharge Detection. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*. Ottawa, Canada, 1997.
- C. Forssén and H. Edin. Modeling of a discharging cavity in a dielectric material exposed to high electric fields. *Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Multiphysics User's Conference 2005 Stockholm*.
- IEC 60270. *High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements*. Geneve, Switzerland, 2000.
- F.H. Kreuger. *Partial discharge detection in High Voltage Equipment*. Butterworths, London.
- E.C.T Macedo. *Metodologia Para a Classificação de Descargas Parciais Utilizando Redes Neurais Artificiais*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Campina Grande.
- J.M.R.S Neto. *Localização de Descargas Parciais Baseada em um Método Radiométrico - Prova do Princípio*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Campina Grande.
- P Veselý and T Tichý and O Šefl and E Horynová. Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,461.